

УДК 532.527:533.697.5

В.М. Турик, Д.Є. Мілюков

## АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТЕЧІЇ У ВИХРОВІЙ КАМЕРІ ІЗ ТОРЦЕВИМ СТРУМИННИМ КЕРУВАННЯМ

In order to find low-powered control system of working flows in vortex chambers (VC) of energetic and technological equipment the compound structure of shear current in one of the most powerful vortex formation ("central quasi-solid vortex" – CQSV) inside of VC dead-end zone was investigated under condition of closed coaxial end jet control actions. The principle of mutual receptivity of vortex structures on macrolevel was taken as a basis upon study of geometric and operating characteristics of these actions. Realization of elaborated gas flows visualization, instrumentation technology and analysis of lines of equal axial velocities distribution in VC dead end part allowed proposal of simple and effective ejector scheme of CQSV and control jet interaction. As result of theoretical extension of experimental data investigation, the integral parameter of transfer processes efficiency in VC working mediums – utilization of CQSV kinetic energy is offered. Important practical problem of mixing process approximate optimization in the VC was solved by rational selection of flow discharges correlation between control jets and outlet stream from camera.

**Keywords:** vortex chamber, coherent vortical structures, control jet, central quasi-solid vortex, flow structure control.

### Вступ

Вихрові камери (ВК) знаходять широке використання в техніці, зокрема, як камери змішування у різних видах промислових топок і пальників [1–3]. Зазвичай у таких пристроях ВК використовують для змішування двох потоків (первинного та вторинного), один з яких містить відновник, наприклад, у складі суміші повітря та подрібненого у пил вугілля або краплин рідкого палива, а другий – окислювач, наприклад, повітря. Правильна організація процесу змішування у ВК дає змогу покращити якість процесу спалювання вихідної суміші і таким чином підвищити економічність, надійність та екологічність устаткування.

У відомих працях [4–6] представлені результати експериментальних досліджень структури течії повітря у ВК з відносно довгою торцевою порожниною, де показано, що структура течії складається із когерентних вихрових структур (КВС), одна з найбільш енергоємних складових яких — так звані "вуса" — розповсюджується переважно у пристінній частині камери вздовж як проточної, так і тупикової її частин. Запропонований також динамічний метод керування структурою течії [6], що оснований на взаємодії затопленого торцевого струменя з КВС у тупиковій частині ВК. Однією з особливостей структури течії в цій зоні є наявність КВС "центрального квазітвердотільного вихору" (ЦКТВ) [5], який є своєрідним кінцевим продуктом взаємодії попередніх КВС у потоці. Назва ЦКТВ зумовлена можливістю опису гідромеханічних властивостей цього вихору за допомогою моделі вимушеного вихору. Зазначе-

ний вихор зароджується біля глухого торця в результаті обертової взаємодії КВС, які спрямовані в напрямку торця з боку основного вхідного сопла переважно у пристінній частині ВК. Звідти ЦКТВ розвивається у бік проточної частини камери вздовж її осі. Формування ЦКТВ відбувається через створення біля торця проміжного торнадоподібного вихрового утворення за типом течії Бюдевадта [7]. Керувальний вплив на ЦКТВ за допомогою конструктивних особливостей основного впускного тангенціального сопла ВК може призводити або до малопродуктивної, з точки зору управління процесами переносу, інтенсифікації квазітвердотільного обертання цієї КВС, або до її повного розділення [8, 9]. В останньому випадку мало б місце некероване порушення розподілу взаємоузгоджених колективних вихрових утворень у тупиковій частині ВК, що ускладнило б застосування принципу взаємної сприйнятливості [10, 11] при виборі оптимальних схем управління структурою течії. Тому видається доцільною, з точки зору ефективності та енергетичної малозатратності, організація системи управління структурою течії на основі безпосереднього (вибіркового) керувального впливу струминних потоків на зазначений ЦКТВ згідно з концепцією динамічного керування КВС [10]. Керувальна дія на ЦКТВ з боку глухого торця може здійснюватися затопленим струменем від спеціального торцевого сопла, що встановлюється коаксіально або із незначним зміщенням від осі камери. Найбільш вдалим способом керованого впливу на течію за Бюдевадтом як початкової складової при формуванні ЦКТВ в торцевій частині ВК є саме коак-

сіальне розташування керувального сопла. А відповідно підібрані геометричні та режимні параметри керувальної струминної дії на цю початкову область ЦКТВ згідно з принципом взаємної сприйнятливості [9–11] можуть докорінно вплинути на структуру течії як у тупиковій зоні, так і у ВК в цілому.

### Постановка задачі

Стаття окреслює окремих напрямків циклу досліджень з вивчення структури течії у ВК при струминних керувальних діях. Одним з етапів цього циклу є спроба теоретичного узагальнення результатів експериментальних досліджень з метою визначення оптимальних за ККД процесу змішування параметрів керувального струменя, що ежектуються або нагнітається до ВК. Цей етап передбачає вирішення кількох питань. По-перше, необхідно окремо розглянути результати візуалізаційних та інструментальних досліджень структури тупикової течії у ВК з коаксіально спрямованим керувальним торцевим струменем. По-друге, на основі результатів експерименту необхідно побудувати та проаналізувати картини розподілу компонент швидкості та виявити поведінку ЦКТВ. По-третє, потрібно визначити метод узагальнення результатів експериментальних досліджень та на його основі запропонувати кількісну оцінку параметрів керування процесом змішування потоків.

### Експериментальна установка та методика проведення досліджень

Наведені експериментальні дослідження були проведені на аеродинамічному стенді, який доволі докладно описаний у джерелах [4, 6, 9, 11], при температурі повітря  $T_\infty = 293\text{K}$  й тиску  $p_\infty \approx 10^5\text{Па}$  на вході до ВК. Для проведення експериментів за вибраним напрямком робоча ділянка аеродинамічного стенду була модернізована. Зокрема, торцевий вузол моделі ВК був переобладнаний з метою встановлення на глухому торці камери керувального торцевого сопла коаксіально з циліндром камери. Схему отриманої моделі робочої ділянки ВК наведено на рис. 1.

Як і раніше [6, 9], робоча ділянка стенду складалась з циліндричної прозорої труби, яка виготовлена з органічного скла та мала поліровані стінки. Внутрішній діаметр труби становив  $d_0 = 2r_0 = 0,102\text{ м}$ . З обох боків труба закінчувалась фланцями, за допомогою яких сполучалась з іншими елементами стенду або з пристроями для вимірювальних інструментів.

Довжина тупикової зони становила  $0,446\text{ м}$  (відстань від глухого торця до середини основного сопла). Прохідний переріз основного впускного сопла мав прямокутну форму  $0,02 \times 0,04\text{ м}^2$  (більша сторона вздовж осі ВК) та закруглені кути радіусом  $5,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ . Кут тангенціальності основного сопла був  $\gamma = 85^\circ$ , а кути його повороту відносно осі ВК варіювались у діапазоні  $\alpha = -20^\circ \dots +20^\circ$ . При  $\alpha = 0^\circ$  вхідний потік спрямовувався практично за дотичною до внутрішньої стінки камери; при  $\alpha < 0^\circ$  вхідний потік був спрямований у бік тупикової зони та при  $\alpha > 0^\circ$  — у бік проточної зони. Витрата повітря через робочу ділянку камери протягом циклу експериментів з вибраного напрямку підтримувалась стабільною: для всіх експериментів з візуалізації потоку й експериментів з використанням пневмометричних засобів число Рейнольдса, що розраховувалось за середньою швидкістю  $W_a$  у проточній частині ВК, було незмінним і з похибкою порядку 1 % становило  $Re_a \approx 29000$ .

Для створення керувального впливу на ЦКТВ у торцевій порожнині ВК було виготовлено накладний торець спеціальної конструкції, що мав торцеве сопло та рушійний меха-

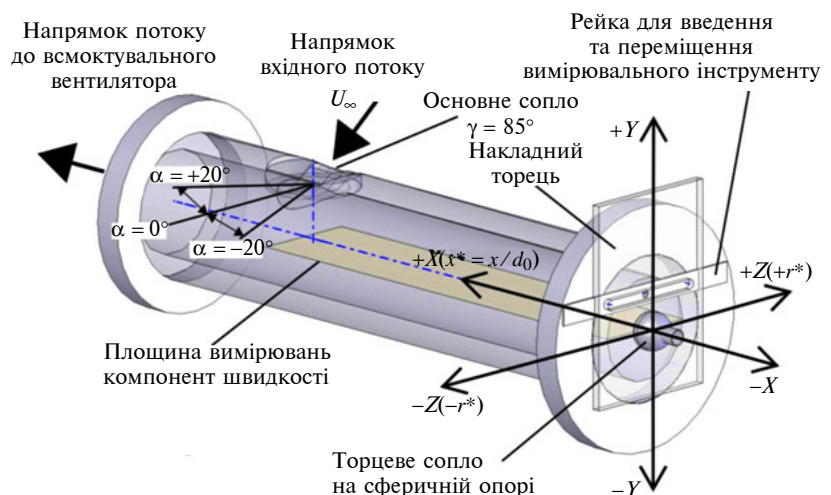


Рис. 1. Модель робочої ділянки вихрової камери

нізм для введення державки вимірювальних інструментів. Торцеве сопло було виготовлено у вигляді конічного збіжного насадка (конусність  $\approx 1^\circ$ ) довжиною  $l_{TC} = 0,051$  м і діаметром вихідного отвору  $d_{TC} = 0,014$  м. Такий діаметр вихідного отвору сопла був прийнятий із таких міркувань: величини добутоків площі перерізу сопла та середніх швидкостей витікання повітря з нього доволі близькі до величин добутоків площі перерізу енергонесучої системи вихрових джгутів у складі "вусів" та середніх швидкостей пересування робочого середовища вздовж їх осей. Такого висновку автори дійшли проаналізувавши енергетичні умови формування ЦКТВ: саме енергонесуча система вихрових джгутів є основним джерелом переносу маси та імпульсу у тупиковій частині ВК, які через взаємодію з іншими КВС передають енергію для створення ЦКТВ. Для стабілізації епюри швидкості всмоктуваної струмینی перед торцевим соплом було встановлено передвключений патрубок довжиною  $15d_{TC}$  (на рис. 1. умовно не показаний). У патрубку було встановлено мініатюрну напірну трубку, що з'єднувалась з диференціальним манометром для вимірювання витрати повітря через торцеве сопло. Режим протікання робочого середовища у керульованому торцевому соплі варіювався у діапазоні чисел Рейнольдса  $Re_{TC} = 14000 \dots 25000$  за рахунок комбінації режимів роботи спеціального нагнітаючого пристрою (батареї послідовно встановлених вентиляторів) та дроселювання потоку в передвключеному патрубку.

Методика проведення експериментальних досліджень полягала у наступному. Спочатку були проведені пробні експериментальні запуски аеродинамічного стенду з метою обрання доцільних геометричних і режимних параметрів ВК, обладнаної керульованим торцевим соплом. На визначених режимах роботи установки проводилися візуалізаційні дослідження картин течії у тупиковій частині ВК. Як контрастні речовини використовувались монодисперсний порошок (пудра), а також дрібна та легка тирса (розмір часток не перевищував  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м). Результати зйомки картин візуалізації реєструвались цифровою камерою та фіксувались за допомогою швидкісних фотоапаратів. Після аналізу картин течії було вибрано площину вимірювань полів осьових швидкостей — горизонтальну площину  $XOZ$  (див. рис. 1), що збігається з поздовжнім горизонтальним перерізом вихрової

камери. Як вимірювальний інструмент використовувався Т-подібний екранований насадок швидкості (ТЕНШ) [4]. ТЕНШ вводився у порожнину ВК з боку глухого торця на спеціальній, достатньо жорсткій державці. Вимірювання за допомогою ТЕНШ проводились дискретно з кроком  $(10 \dots 20) \cdot 10^{-3}$  м вздовж осі  $X$  та  $(3 \dots 5) \cdot 10^{-3}$  м вздовж осі  $Z$  у перерізі  $0,102 \times 0,455$  м<sup>2</sup>, що забезпечувалось координатним пристроєм, встановленим зовні камери, за її торцевою частиною. Величини швидкостей розраховувались згідно з вимірюваними значеннями перепадів тиску на ТЕНШ та залежностями градування. На цьому етапі досліджень картини розподілу трансверсальних швидкостей не враховувались, оскільки запропоновані методи керування структурою течії та теоретичного узагальнення її характеристик базуються на схемі ежекції або нагнітання потоку в осьовому напрямку камери співвісно з ЦКТВ. Саме цей потік певною мірою визначає внесок до сумішоутворення (через створення поздовжньо-обертального зсувного ефекту) й до витрати робочого середовища у межах ЦКТВ.

#### Побудова й аналіз картин течії, отриманих експериментально

Для кращого розуміння основних напрямків розвитку вихрових утворень у загальній картині течії, що будувались графічно на основі результатів інструментальних досліджень, першочергово були проведені візуалізаційні дослідження. Застосування як контрастних речовин пудри та тирси при спеціальній системі підсвічування потоку в камері дали змогу побачити реальне переміщення частинок робочого середовища в камері. Деякі результати наведено на рис. 2. На перших трьох кадрах плівки (рис. 2, а–в) видно, як у ВК з глухим торцем поступово проявляється явище "торцевого ефекту" (потік через основне тангенціальне сопло "підсвічується" пудрою). Під час проведення даних спостережень на поверхні прозорого корпусу камери були нанесені спеціальні позначки (рис. 2, г), за допомогою яких було зафіксовано топологію вихрового утворення "вуса" у камері з глухим торцем. Після цього замість глухого торця було встановлено накладний торець спеціальної конструкції, що включає центральне керульоване сопло, через яке було реалізовано струминний вплив на структуру течії у ВК.

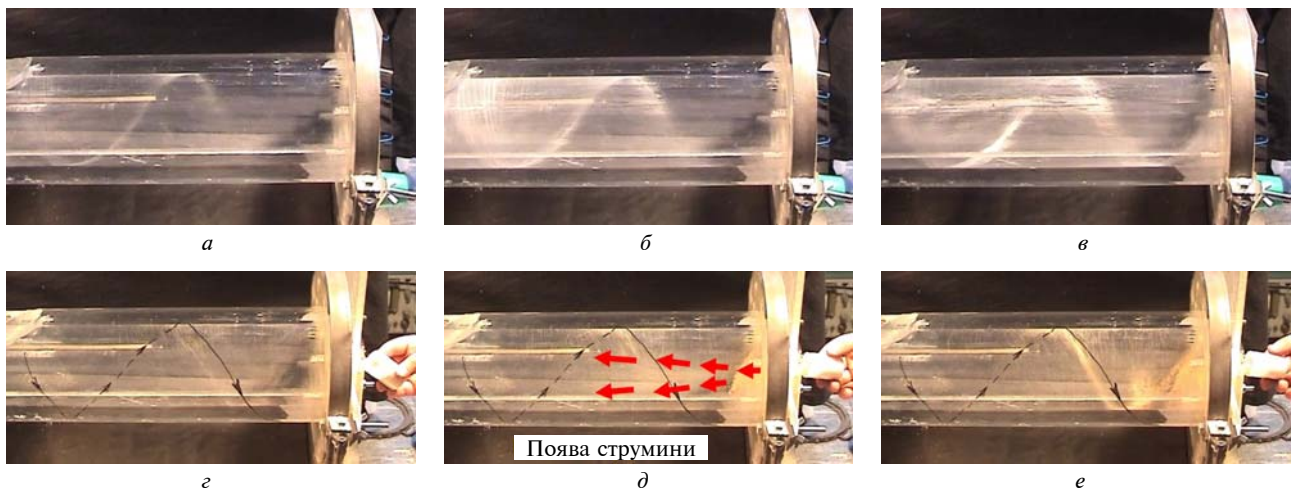


Рис. 2. Візуалізація течії у тупиковій частині ВК: *а, б, в* – “торцевий ефект” у ВК з глухим торцем; *г, д, е* – вплив на потік торцевої струмини

Через нерівномірність розповсюдження пудри в межах ЦКТВ для подальших візуалізаційних експериментів було застосовано тирсу. Тирса додавалась у повітря одночасно через основне тангенціальне сопло та керувальне торцеве сопло. На рис. 2, *д* можна побачити, як частинки тирси проявляються в осьовій частині камери. Причому крок розповсюдження вихрового утворення “вуса” у бік торця зменшується (рис. 2, *г–е*) порівняно з камерою, яка має глухий торець (рис. 2, *а–в*). Багатократне повторювання експерименту та відповідний аналіз відзнятого матеріалу дають право стверджувати, що частинки контрастної речовини, які вводились через керувальне сопло, розповсюджувались у порожнині камери виключно у складі ЦКТВ в осьовій частині ВК. Цей факт було покладено в основу подальшого аналізу картин течії у ВК з коаксіальним керувальним торцевим соплом.

Результати інструментальних вимірювань осьових швидкостей опрацьовувались за допомогою програмного пакета SigmaPlot 11.0. Ця

методика дала змогу побудувати розподіл ізотак течії у вигляді контурних графіків, що у кольоровому вигляді відтворюють картини течії у порожнині ВК (рис. 3–6). Переходи між рівнями швидкостей на графіках визначались по ізотах з відповідними значеннями, а відтинки сірого кольору та білий – відображали напрямки та інтенсивність руху потоків. Наприклад, ділянки на картинах осьових швидкостей білого кольору означають напрямок руху робочої рідини від основного тангенціального сопла ВК в сторону глухого торця (“торцевий ефект” [4]) – позитивні значення швидкостей; ділянки графіка з відтинками сірого кольору – напрямки руху від глухого торця в сторону проточної частини ВК – від’ємні значення швидкостей. Усі картини осьових швидкостей побудовані у безрозмірних координатах (відносно середньовитратної швидкості потоку  $W_a$  у проточній частині ВК), тобто картини течій побудовані у

$$W^* = \frac{W}{W_a}.$$

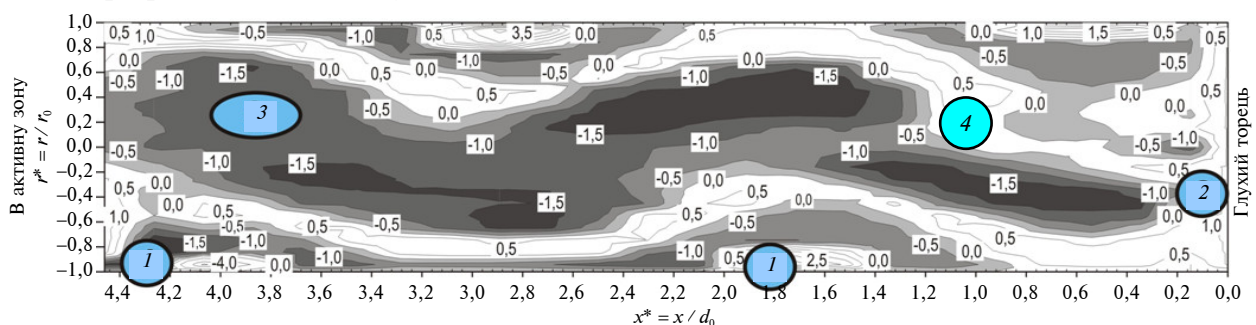


Рис. 3. Елементи картини течії ( $Re_a = 28606$ ): *1* – вихрове утворення “вуса”; *2* – течія за Бюдевадтом; *3* – ЦКТВ; *4* – меандруюче циліндричне вихрове утворення



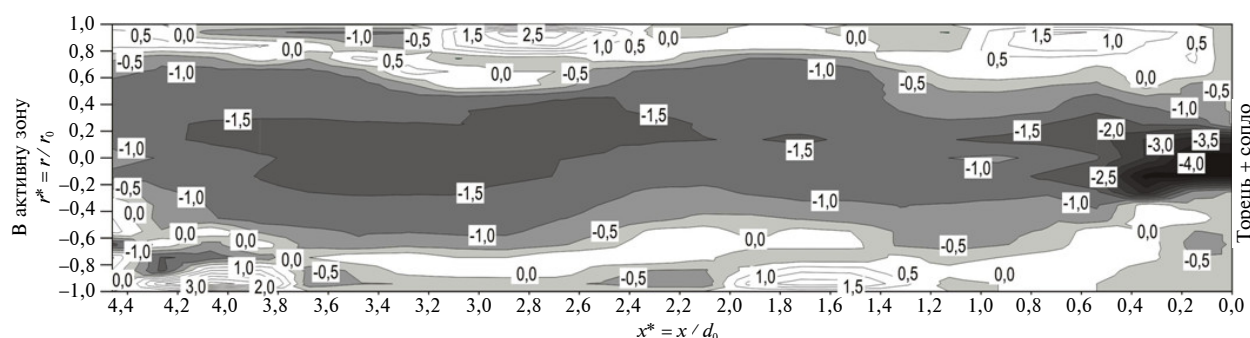


Рис. 4. Картина течії за умов мінімального значення витрати крізь керувальне сопло при  $Re_{TC}^{\min} = 14850$

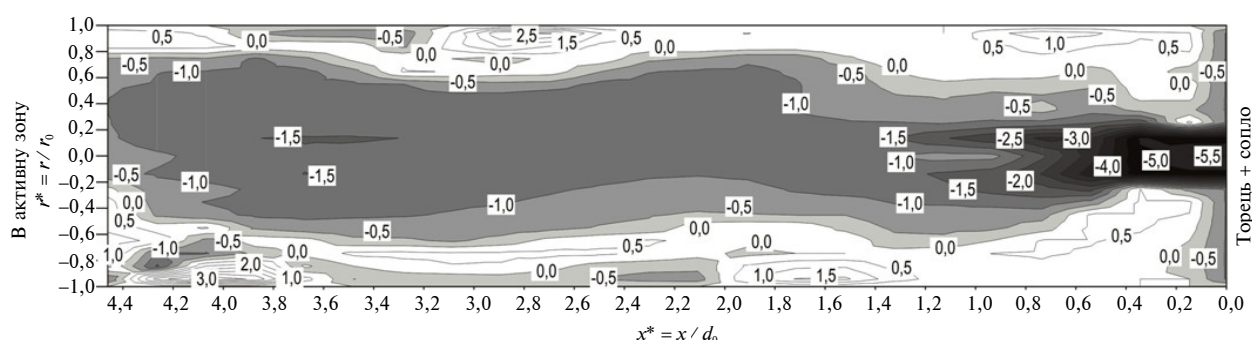


Рис. 5. Картина течії за умов проміжного значення витрати крізь керувальне сопло при  $Re_{TC} = 19752$

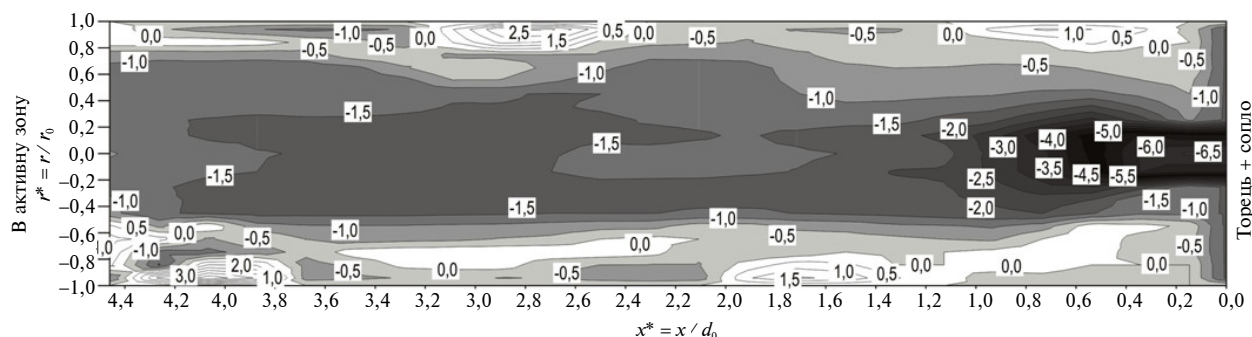


Рис. 6. Картина течії за умов максимального значення витрати крізь керувальне сопло при  $Re_{TC}^{\max} = 24366$

На рис. 3 показано основні елементи течії у тупиковій частині ВК з глухим торцем, що отримали зазначені нижче назви внаслідок багатократних експериментальних досліджень авторів праць [4, 5].

У цій статті наводяться результати експериментів для трьох значень витрати повітря в керувальному торцевому соплі: мінімального значення ( $Re_{TC}^{\min} = 14850$ ) — завдяки введенню місцевого опору на початку передвключеного патрубку, керувальне сопло в режимі самовсмоктування; проміжного значення витрати ( $Re_{TC} = 19572$ ) — місцевий опір на передвключеному патрубку відсутній, режим самовсмоктування; максимального значення витрати

( $Re_{TC}^{\max} = 24366$ ), що утворюється за рахунок спеціального нагнітаючого пристрою (батарея послідовно встановлених вентиляторів).

Картину течії у тупиковій частині ВК ( $Re_a = 28606$ ) для першого випадку наведено на рис. 4.

Порівнюючи картини течії на рис. 3 та 4 можна відзначити, що при застосуванні керувального струменя з мінімальною витратою вихрове утворення “вуса” зменшує свою інтенсивність в осьовому напрямку (див. рис. 4). Таке зменшення можна пояснити тим, що у тупиковій зоні ВК відбувається компенсація “торцевого ефекту” за рахунок додаткового притоку робочого середовища через керувальне сопло.

“Хвилястість” форми вихрового утворення ЦКТВ, на яке спрямовується керувальна дія, теж зменшується вздовж осі камери, а зона локальних збільшень відносної швидкості руху за модулем в осьовому напрямку ( $W^* = -1,5$ ) зсувається до основного вхідного сопла на 10 % при більш рівномірному розподіленні по довжині зазначеної вихрової структури відносно осі ВК. Аналіз розташування зон локалізації максимальної за модулем осьової швидкості в ЦКТВ по рис. 3, 4 (зони темно-сірого кольору) показує такі особливості: під дією керувального торцевого струменя перші дві зони в межах відрізка осьової координати  $x^* = 1,4...3,8$  (див. рис. 3) з’єднуються між собою в діапазоні  $x^* = 2,1...4,2$  (див. рис. 4), а замість третьої зони в межах  $x^* = 0,3...1,45$  (див. рис. 3) має місце більш енергоємна, особливо в біяторцевій області, зона максимальних значень швидкості загальною протяжністю  $x^* = 0...1,0$  (див. рис. 4). Що стосується взаємодії інших КВС у потоці, то зі зменшенням інтенсивності вихрового утворення “вуса”, зменшується й інтенсивність розповсюдження меандруючого циліндричного вихрового утворення, що поступово притискається до циліндричної стінки камери.

При збільшенні витрати робочої рідини крізь торцеве сопло утворюється картина течії, показана на рис. 5 ( $Re_a = 28905$ ). Тут можна помітити істотне звуження ЦКТВ по довжині ВК та незначне зменшення інтенсивності розповсюдження вихрового утворення “вуса” біля торця камери. Меандруюче циліндричне вихрове утворення набуває більших розмірів, займаючи більший простір порожнини камери, але з незначною інтенсивністю. Локальні зони збільшення швидкості, типові для попередніх випадків, нівелюються за рахунок збільшення вже згаданої компенсації “торцевого ефекту” притоком керувального струменя, що переконливо відображає більш витягнута вздовж осі ВК біяторцева область підвищених за модулем швидкостей. Варто відзначити, що із збільшенням витрати крізь керувальне сопло на картині течії у центральній частині струминного потоку можна помітити тенденцію до утворення зворотних потоків, про які згадується у праці Г.Н. Абрамовича [12]. Дати чітке визначення розвитку зворотних течій у струминному потоці за методикою Г.Н. Абрамовича доволі складно, оскільки вона передбачає знання співвідношення колової та середньовитратної компо-

нент швидкості витікання рідини із сопла. У цьому випадку визначення колової компоненти на зрізі керувального сопла ускладнюється через значну нерівномірність формування течії біля торця камери.

Подальше збільшення витрати крізь керувальне сопло ( $Re_a = 29004$ ) веде до таких особливостей структури течії (рис. 6): по-перше, збільшуються радіальні розміри ЦКТВ, який місцями майже досягає циліндричної стінки тупикової порожнини ВК; по-друге, через розширення ЦКТВ зникає меандруюче циліндричне вихрове утворення. Треба відзначити, що інтенсивність розповсюдження вихрового утворення “вуса” залишається незмінною в досліджуваному діапазоні зміни чисел Рейнольдса  $Re_{TC} = 14850 - 24366$ . Порівнюючи всі три картини течії у ВК з керувальним торцевим соплом (див. рис. 4–6), можна зробити висновок стосовно форми ЦКТВ: із збільшенням витрати через керувальне сопло поздовжня криволінійність цієї КВС вирівнюється, вона зростає у розмірах, що робить процес змішування більш простим за структурою течії. Варто зауважити, що за умов подальшого збільшення витрати через керувальне торцеве сопло, що супроводжується розширенням ЦКТВ та поступовим зникненням меандруючого циліндричного вихрового утворення, може настати ситуація, коли торцева частина ВК перетвориться на “проточну” частину камери з певними кільцевими застійними зонами у кутовому просторі біля торця.

Отже, розглядаючи картини течії у тупиковій частині ВК при дії коаксіально розташованого торцевого струменя (див. рис. 4–6), можна виділити три основні зони: перша – зона виходу керувального струменя із сопла (діапазон  $0 < x^* < 0,6$ ); друга – зона змішування керувальної струминної течії з ЦКТВ (приблизний діапазон  $0,4 < x^* < 1,0$  із врахуванням деякого перекриття діапазонів); третя – зона переміщення змішаного потоку у складі ЦКТВ в бік проточної частини (діапазон взаємодії  $x^* > 1,0$ ).

Аналіз зазначених зон дає можливість провести в деякому наближенні аналогію з процесами переносу маси та енергії робочої рідини у вихрових газових ежекторах [13]. Започаткована роботами К.К. Бауліна та С.О. Христіановича [14] теорія газових ежекторів, яка у подальшому розвинена Г.Н. Абрамовичем [15],

дає змогу побудувати наступну схему взаємодії потоків у тупиковій частині ВК. Функції ежектуючого потоку виконує торнадоподібна ділянка ЦКТВ. Потік крізь керувальне торцеве сопло (умовно – ежектований потік) всмоктується потоком ЦКТВ або додатково нагнітається вздовж його осі. Змішаний потік ежектуючого та ежектованого середовищ переміщується у складі ЦКТВ вздовж всієї тупикової порожнини ВК в напрямку її проточної частини. Оскільки потік у складі ЦКТВ у деякому наближенні можна вважати відокремленим від інших областей складної течії завдяки практичній відсутності значних радіальних перетоків, то такий потік, за аналогією з традиційним газовим ежектором, можна вважати своєрідною камерою змішування.

#### Обговорення результатів експериментальних досліджень та їх теоретичне узагальнення

Аналіз картин течії на рис. 4–6 дає можливість встановити, що формування струминної течії на виході з керувального сопла обмежене лише діапазоном  $0 < x^* < 1,2$  торцевої порожнини ВК. Для здійснення узагальнення отриманих експериментальних даних необхідно визначити розрахунковий поперечний переріз, в якому структура течії відображає чітку взаємодію керувального струменя з ЦКТВ. Такий переріз було знайдено так: у перерізах  $x^* = 0,343; 0,539; 0,735; 0,931; 1,127$  визначено величини об'ємних витрат течії  $Q_i$  у складі ЦКТВ; знайдено середньоарифметичне (ефективне) значення цих витрат  $Q_{\Sigma \text{ЦКТВ}}$ ; прийнято, що місце розташування шуканого перерізу має відповідати витраті, максимально наближеній до наведеного значення  $Q_{\Sigma \text{ЦКТВ}}$ . Розрахунок було здійснено для картини течії при  $Re_{TC} = 19752$  (див. рис. 5). Результати обчислень зведено до таблиці відповідно до розрахун-

кової схеми, наведеної у відносних величинах нижче на рис. 7, яка базується на наступних положеннях. Робоче середовище у складі ЦКТВ обмежене циліндричною поверхнею, подібної до вихрової трубки. Для визначення величин об'ємної витрати у кожному  $i$ -му перерізі виділяється лише однонаправлена (від'ємна) частина профілю швидкості, що відтворює осьовий потік у ЦКТВ (рис. 7, а), а частина графіка з протилежним (додатним) напрямком вилучається (на рис. 7, а:  $d_{\max}^*$  – первинна основа профілю швидкості сумарного циліндричного потоку у складі ЦКТВ,  $W_{\max}^*$  – максимальне за модулем значення відносної осьової швидкості). На виділеній таким чином частині графіка (рис. 7, б), визначаються значення діаметра та середньої швидкості сумарного потоку.

У таблиці містяться такі параметри:

- $d_i^* = \frac{d_i}{d_0} = |r_i^*(-)| + r_i^*(+)$  – відносний ді-

аметр сумарного потоку у складі ЦКТВ для відповідного  $i$ -го перерізу ВК;  $r_i^*(-)$  та  $r_i^*(+)$  – відносні радіусні відстані у перерізі на від'ємній та додатній півосях відповідно (визначаються за схемами на рис. 7 та картинами течій);

- $S_i = \frac{\pi d_i^2}{4}$  – площа  $i$ -го поперечного перерізу сумарного потоку у складі ЦКТВ,  $m^2$ ;

- $W_i = W_{m_i}^* W_a$  – середня швидкість сумарного потоку у складі ЦКТВ в  $i$ -му перерізі,  $m/c$ ;  $W_{m_i}^*$  – відповідна відносна середня швидкість сумарного потоку у складі ЦКТВ, що визначається положенням на графіку середньої лінії трапецієвидного профілю швидкості неправильної форми;  $W_a$  – середньовитратна швидкість потоку через ВК,  $m/c$ ;

- $Q_i = W_i S_i$  – об'ємна витрата сумарного потоку у складі ЦКТВ в  $i$ -му перерізі,  $m^3/c$ ;

**Таблиця.** Параметри для визначення розрахункового перерізу взаємодії струменя з ЦКТВ

$x^*$	$d_i^*$	$S_i, m^2$	$W_i, m/c$	$Q_i, m^3/c$	$\delta_Q = \left  \frac{Q_{\Sigma \text{ЦКТВ}} - Q_i}{Q_{\Sigma \text{ЦКТВ}}} \right  100 \%$
0,343	0,4509	0,00166	10,251	0,01702	10,73520
0,539	0,5667	0,00262	5,902	0,01546	0,58556
0,735	0,6516	0,00347	4,547	0,01578	2,66753
0,931	0,6714	0,00368	3,844	0,01415	7,93754
1,127	0,7340	0,00440	3,277	0,01442	6,18087

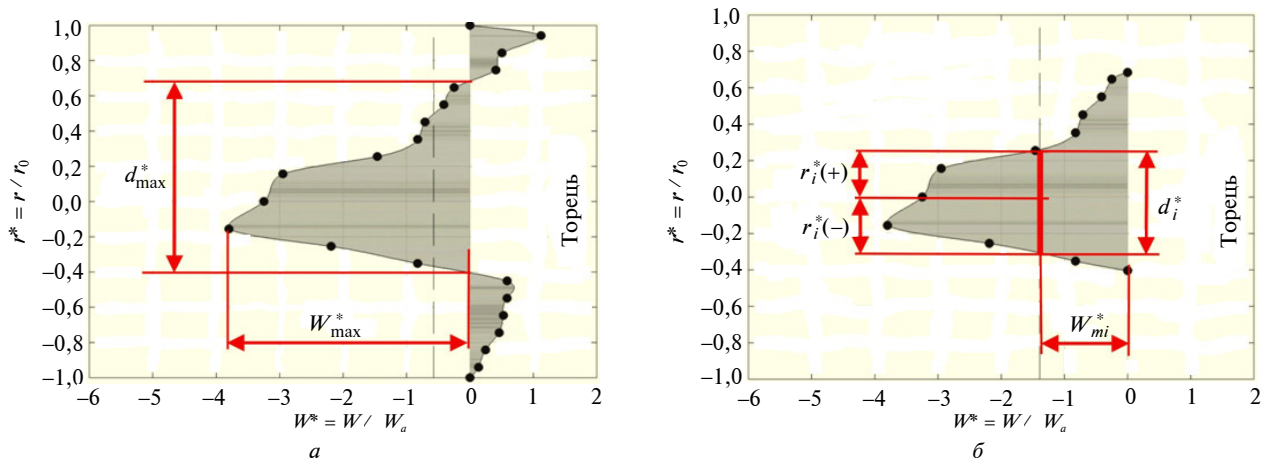


Рис. 7. Схема визначення вихідних даних для розрахунків: а – виділення однонаправленої частини профілю швидкості; б – графічне визначення відносних величин середньої швидкості та розрахункового діаметра ЦКТВ

- $Q_{\Sigma \text{ ЦКТВ}}$  – середнє значення витрати у

складі ЦКТВ,  $Q_{\Sigma \text{ ЦКТВ}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} = 0,01537 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

- $\delta_Q$  – відносна похибка визначення ефективного значення об'ємної витрати  $Q_{\Sigma \text{ ЦКТВ}}$ .

Графіки для кожного  $i$ -го перерізу були побудовані за допомогою згаданого вище програмного пакета Sigma Plot 11.0 та опрацьовані за наведеною методикою.

Варто відзначити, що під час інструментальних досліджень картин течії певна нестійкість КВС у структурі потоку поблизу торця ВК призводила до коливання показників на диференційному манометрі, за допомогою якого вимірювались значення витрати повітря крізь керувальне сопло. Так, для картини течії на рис. 5 коливання показників відбувалось у межах  $(84...99) \cdot 10^{-3} \text{ м сп. ст.}$ , що у свою чергу вело до змін середньої швидкості у торцевому керувальному соплі у діапазоні  $19,391 - 21,051 \text{ м/с}$ . Оскільки для розрахунків і побудови картин течій була прийнята середня величина зазначеного діапазону, то відхилення значень швидкості в цьому випадку становило не більше  $\pm 5\%$ , що можна вважати незначним.

Перерізи  $x^* = 0,539$  та  $x^* = 0,735$  у торцевій порожнині ВК за результатами обчислень відносної похибки  $\delta_Q$  (див. таблицю) можна вважати найбільш вдалим для визначення розрахункового перерізу. Переріз  $x^* = 0,343$

має найбільшу похибку в розрахунках через те, що вимірювання за допомогою насадка ТЕНШ відбувається у безпосередній близькості до торця та керувального сопла – області дуже складної структури течії, що утруднює вибір адекватного розташування вимірювального насадка. Характерно, що у перерізах, розташованих при  $x^* > 0,735$ , похибка також збільшується через конвективну дифузію потоку та значне розсіювання затопленого керувального струменя. Через це розрахункові значення сумарної об'ємної витрати робочого середовища у складі ЦКТВ для відповідних перерізів  $Q_i$  є меншими, ніж ефективне значення сумарної витрати  $Q_{\Sigma \text{ ЦКТВ}}$ . Таким чином, для подальших розрахунків будемо використовувати дані саме для перерізу  $x^* = 0,539$  ( $Q_{\Sigma \text{ ЦКТВ}} = Q_{\Sigma}$ ), оскільки для нього значення похибки розрахунків графічним методом є найменшим (див. таблицю).

Визначивши положення розрахункового перерізу, приймаємо припущення, на основі яких побудуємо теоретичні засади щодо узагальнення результатів експериментальних досліджень:

- під камерою змішування будемо розуміти частину потоку в тупиковій зоні ВК від глухого торця до основного впускного тангенціального сопла, що обмежується дією меандруючої циліндричної КВС;

- процес змішування вздовж камери – ізобарний ( $p = \text{idem}$ ) при формуванні поля швидкості у порожнині камери змішування.

Оскільки конструктивно ВК має один вихід (проточна частина) та два входи (основне



тангенціальне сопло та керувальне торцеве сопло), то на основі теорії імпульсів можна припустити, що на виході з камери змішування секундна кількість руху змішаного потоку дорівнює сумі секундних кількостей руху потоків, що підведені до камери змішування:

$$\begin{aligned} \rho Q_{\text{ЦКТВ}} W_{\text{ЦКТВ}} + \rho Q_{\text{ТС}} W_{\text{ТС}} = \\ = \rho (Q_{\text{ЦКТВ}} + Q_{\text{ТС}}) W_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $Q_{\text{ЦКТВ}} = Q_{\Sigma} - Q_{\text{ТС}}$  — об'ємна витрата потоку у складі ЦКТВ (ежектуючий потік);  $Q_{\text{ТС}}$  — об'ємна витрата потоку крізь керувальне сопло (ежектований потік);  $W_{\text{ЦКТВ}} = \frac{Q_{\text{ЦКТВ}}}{S_{\text{ЦКТВ}}}$  — середньовитратна швидкість ежектуючого потоку в межах ЦКТВ;  $S_{\text{ЦКТВ}}$  — площа поперечного перерізу ежектуючого ЦКТВ;  $\rho$  — густина робочого середовища;  $W_{\text{ТС}}$  — середньовитратна швидкість на зрізі керувального сопла;  $W_{\Sigma} = \frac{Q_{\Sigma}}{S_{\text{ЦКТВ}}}$  — середньовитратна швидкість сумарного змішаного потоку, що складається з ежектуючого та ежектованого потоків.

Секундна кінетична енергія сумарного потоку на виході з камери змішування:

$$E_{\text{вих}} = (Q_{\text{ЦКТВ}} + Q_{\text{ТС}}) \frac{\rho W_{\Sigma}^2}{2}. \quad (2)$$

Секундна кінетична енергія потоку КВС та ежектованої струминної течії на вході до камери змішування:

$$E_{\text{вх}} = Q_{\text{ЦКТВ}} \frac{\rho W_{\text{ЦКТВ}}^2}{2} + Q_{\text{ТС}} \frac{\rho W_{\text{ТС}}^2}{2}. \quad (3)$$

Втрати кінетичної енергії “на удар” у процесі змішування становитимуть

$$\begin{aligned} \Delta E = E_{\text{вх}} - E_{\text{вих}} = \\ = \frac{\rho}{2} \frac{Q_{\text{ЦКТВ}} Q_{\text{ТС}}}{Q_{\text{ЦКТВ}} + Q_{\text{ТС}}} (W_{\text{ЦКТВ}} - W_{\text{ТС}})^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Частка підведеної кінетичної енергії, яка витрачається на удар у процесі змішування (“відносна втрата на удар”):

$$\delta E = \frac{\Delta E}{E_{\text{вх}}} = \frac{m \left( 1 - \frac{W_{\text{ТС}}}{W_{\text{ЦКТВ}}} \right)^2}{(1+m) \left( 1 + m \frac{W_{\text{ТС}}^2}{W_{\text{ЦКТВ}}^2} \right)}, \quad (5)$$

де  $m = \frac{Q_{\text{ТС}}}{Q_{\text{ЦКТВ}}}$  — коефіцієнт ежекції.

Введемо поняття коефіцієнта використання кінетичної енергії ежектуючої КВС, що інтегрально характеризує ККД процесу змішування, який будемо визначати за формулою

$$\eta = 1 - \delta E. \quad (6)$$

Результати обчислень за формулами (1)–(6) наведено на рис. 8 у вигляді розподілів величин  $\delta E = f\left(\frac{Q_{\text{ТС}}}{Q_a}, \alpha\right)$  та  $\eta = f\left(\frac{Q_{\text{ТС}}}{Q_a}, \alpha\right)$  для розрахункового перерізу  $x^* = 0,539$  ( $Q_a$  — значення витрати у проточній частині ВК).

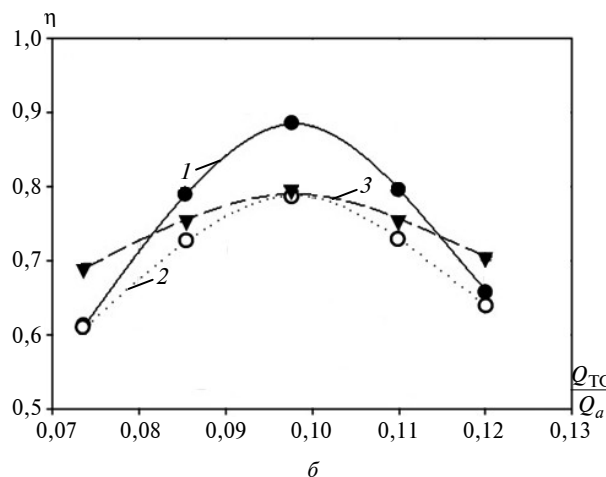
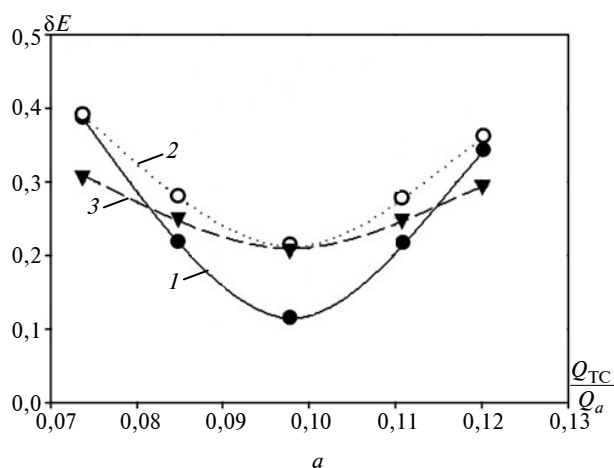


Рис. 8. Відносна втрата кінетичної енергії на удар при змішуванні (а) та коефіцієнт використання кінетичної енергії ежектуючої КВС (б) для розрахункового перерізу  $x^* = 0,539$  (1 —  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 —  $\alpha = -20^\circ$ ; 3 —  $\alpha = +20^\circ$ )

Графіки для трьох положень основного вхідного тангенціального сопла вказують на наявність оптимального співвідношення витрати керувального струменя до загальної витрати робочого середовища на виході з ВК  $\frac{Q_{TC}}{Q_a} = 0,0978$ , яке забезпечує чітко виражені екстремуми — мінімальні значення втрат кінетичної енергії та, відповідно, максимальні величини ККД процесу змішування. З цього випливає практична рекомендація: при витримванні співвідношення  $\frac{Q_{TC}}{Q_a}$  на рівні 0,0978 ко-

ефіцієнт використання кінетичної енергії ежектуючої КВС наближається до максимальних значень  $\eta_{\max} = 0,8 - 0,9$ .

Для порівняння результатів теоретичного узагальнення експериментальних даних наве-

демо також результати розрахунків для інших перерізів (рис. 9).

Як видно з рис. 8 і 9, результати розрахунків величини  $\eta$  у перерізах  $x^* = 0,735$  та  $x^* = 0,539$  є достатньо близькими, а екстремальні значення  $\eta$  на графіках  $\eta = f\left(\frac{Q_{TC}}{Q_a}, \alpha\right)$

для перерізів  $x^* = 0,931$  та  $x^* = 1,127$  значно перевищують максимальні величини  $\eta$  для розрахункового перерізу  $x^* = 0,539$ . Це можна пояснити таким чином.

Зазначений коефіцієнт характеризує участь ЦКТВ у процесі взаємодії з керувальним струменем у межах камери змішування. Аналіз течії в зоні, де відбувається дифузійне розсіювання торцевої струминної течії, дає змогу стверджувати, що внесок зазначеної КВС у процес змі-

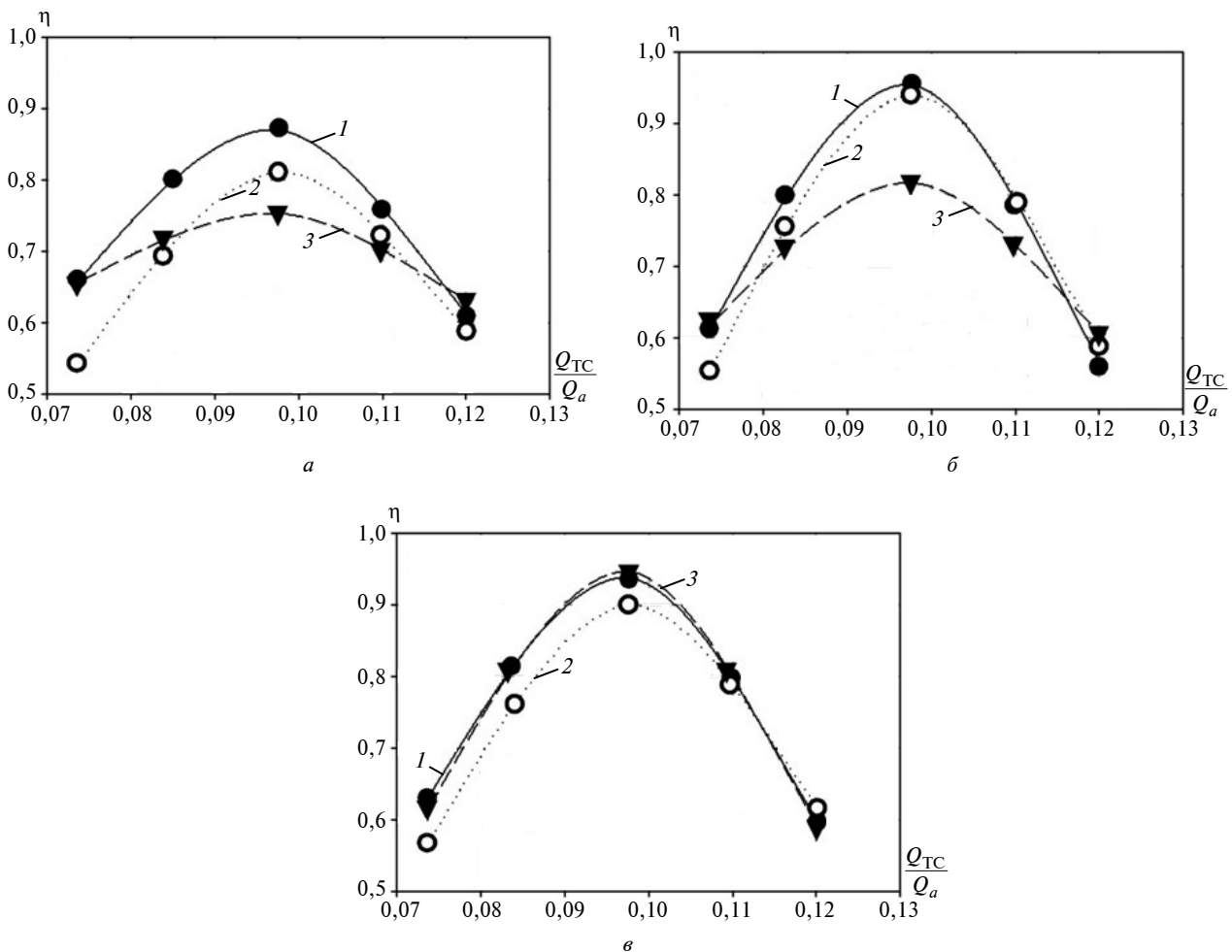


Рис. 9. Коефіцієнт використання кінетичної енергії ежектуючої КВС для різних перерізів ВК:  $x^* = 0,735$  (а),  $x^* = 0,931$  (б),  $x^* = 1,127$  (в) (1 -  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 -  $\alpha = -20^\circ$ ; 3 -  $\alpha = +20^\circ$ )

шування збільшується із збільшенням поздовжньої координати  $x^*$ , а вплив ежектованого струменя нівелюється.

Тому видається доцільною, з точки зору ефективності й енергетичної малозатратності, організація системи управління структурою течії саме на основі безпосереднього (вибіркового) керувального впливу струминних потоків на зазначений ЦКТВ згідно з концепцією динамічного керування КВС

Для більш коректної оцінки особливостей взаємодії ЦКТВ з торцевим струменем у процесі змішування визначення розрахункового перерізу, про що йшла мова вище, є недостатнім. Необхідно мати надійні дані не тільки з кінематики потоку на макрорівні, але й з характеристик тонкої вихрової структури зсувної течії у тупиковій порожнині ВК. Надзвичайна складність аналітичних і числових розрахунків для отримання зазначених даних на сьогодні залишає лише один шлях розв'язання цієї задачі — шлях подальшого, більш детального експериментального вивчення мікроструктури таких течій. Відзначимо, що відомий з [6] динамічний метод керування структурою течії у ВК за допомогою зміщеного торцевого керувального струменя не може бути охоплений представленою методикою визначення коефіцієнта  $\eta$  з огляду на такі чинники. По-перше, згідно із згаданим динамічним методом керувальний струмінь використовувався для впливу не на ЦКТВ, а на найбільш енергоємне спіралеподібне вихрове утворення "вуса". По-друге, механізми ежекції керувального струменя в цих випадках є різними через відмінність розташування та кутової орієнтації керувального струменя, що передбачає застосування інших інструментальних засобів дослідження, а відтак і постановки окремого експериментального дослідження.

### Список літератури

1. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. — Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1981. — 366 с.
2. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки: пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 588 с.
3. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 3. Закрученные потоки / А.А. Халатов, А.А. Авраменко, И.В. Шевчук. — К.: Ин-т теплотехники НАН Украины, 2000. — 474 с.
4. Макаренко Р.А., Турик В.Н. Кинематика течения в тупиковой части вихровой камеры // Прикл. гидромех. — 2001. — 3(75), № 1. — С. 46–51.
5. Бабенко В.В., Турик В.Н. Макет вихревых структур в вихровой камере // Прикл. гидромех. — 2008. — 10(82), №3. — С. 3–19.
6. Турик В.Н., Бабенко В.В., Милоков Д.Е. О динамическом методе управления структурой течения в вихре-

### Висновки

Візуалізація структури течії повітря та аналіз полів розподілу осьової компоненти швидкості показали, що при керувальних діях затопленим струменем на ЦКТВ має місце перерозподіл локальних характеристик тупикової течії порівняно з її картинами в аналогічній області вихрової камери за відсутністю торцевого струминного управління процесом змішування. Проте якісне збереження загальної топології взаємоузгоджених колективних вихрових утворень значно спрощує застосування принципу взаємної сприйнятливості при виборі оптимальних схем управління структурою течії в камері.

Запропоновано доволі просту й ефективну ежекторну схему взаємодії енергоємної когерентної структури у вихровій камері з керувальним струменем.

На основі теореми про зміну кількості руху запропоновано коефіцієнт використання кінетичної енергії ЦКТВ, що дає можливість оцінити ККД процесу змішування робочих середовищ у порожнині вихрової камери.

Доведено можливість постановки та практичного розв'язання задачі наближеної оптимізації процесу змішування в камері раціональним підведенням до її порожнини потоків газоподібних середовищ, один з яких виконує функцію керувального.

Підтверджено правомірність застосування на макрорівні методу взаємної сприйнятливості вихрових структур при розробленні методів керування процесами переносу у вихрових камерах. При цьому отримані загальні картини розподілу характеристик складної течії окреслюють конкретні зони, які потребують більш дрібної просторової дискретизації області спостереження, а також визначають вихідні вимоги до характеристик інформаційно-вимірювальних засобів при постановці подальших досліджень тонкої структури течій зазначеного класу.

- вой камере // Восточно-европейский журн. передовых технол. — 2012. — № 5/7 (59). — С. 52–59.
7. *U.T. Bodewadt*, “Die Drehstromung uber festen Grund,” *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 20, pp. 241–253, 1940.
  8. *Патент України № 3443 U МПК 7 B01F 5/00*, 2004., Камера змішування з додатковими соплами / В.М. Турик, В.В. Бабенко, В.Г. Рожавський. — Опуб. 15.11.2004; Бюл. 11.
  9. *Турик В.Н., Мілюков Д.Е.* К выбору способа управления структурой течения в тупиковой части вихревой камеры // *Вісн. НТУУ “КПІ”: Машинобудування*. — 2011. — № 63. — С. 70–73.
  10. *Babenko V.V.*, “Control of the coherent vortical structures of a boundary layer,” *Aerodynamic Drag Reduction Technologies, Proc. of the CEAS / DragNet European Drag Reduction Conf., Potsdam, Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2001, pp. 341–350.
  11. *Турик В.Н.* О взаимной восприимчивости вихревых структур и управлении ими // *Вісн. НТУУ “КПІ”: Машинобудування*. — 2009. — № 56. — С. 286–299.
  12. *Теория турбулентных струй* / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенников и др. / Под ред. Г.Н. Абрамовича. — М.: Наука, 1984. — 716 с.
  13. *Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 4. Инженерное и технологическое оборудование* / А.А. Халатов, А.А. Авраменко, И.В. Шевчук. — К.: Ин-т теплофизики НАН Украины, 2000. — 212 с.
  14. *Христианович С.А.* О расчете эжектора // *Промышленная аэродинамика (Сб. стат.)*. — М.: ЦАГИ. Бюро новой техники НКАП, 1944. — С. 3–17.
  15. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. Ч. 1. — М.: Наука, 1991. — 600 с.

Рекомендована Радою  
Механіко-машинобудівного інституту  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
28 жовтня 2013 року